

PERANCANGAN KONTROLER PID TYREUS-LUYBEN UNTUK KENDALI VIBRASI PADA ROBOT *SINGLE LINK FLEXIBLE JOINT MANIPULATOR*

Wahyu Raka Adzani

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Ketintang 60231, Indonesia

e-mail : wahyuadzani@mhs.unesa.ac.id

Muhamad Syariffuddin Zuhrie

Dosen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas negeri Surabaya, Ketintang 60231, Indonesia

e-mail : zuhrie@unesa.ac.id

Abstrak

Robot *single link flexible joint manipulator* merupakan salah satu wujud dari perkembangan teknologi kendali zaman modern. Salah satu penerapan dari robot *single link flexible joint manipulator* yaitu space robot. Dalam melakukan pergerakan, robot manipulator terkadang memiliki permasalahan pada fleksibilitas yaitu ketidakakuratan posisi yang disebabkan oleh adanya vibrasi. Tujuan dari penelitian ini adalah merancang sebuah kontroler PID Tyreus-Luyben untuk mengatasi masalah fleksibilitas pada robot manipulator. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa Nilai parameter PID yang ditemukan dengan menggunakan metode Tyreus-Luyben yaitu nilai $K_p = 6.26$, $K_i = 0.3367$, dan $K_d = 0.216$. Kemudian nilai tersebut diterapkan pada sistem dan memberikan respon osilasi yang baik pada setpoint 180° dengan *maximum overshoot* sebesar 182° , *time constant* (τ) sebesar 1.86s, *time sampling* (T_s) pada 3.22s, *rise time* (T_r) selama 4.0868s, *delay time* (T_d) selama 1.2893s, dan *peak time* (T_p) saat 3.02s.

Kata Kunci: Robot Manipulator, Kontroler PID, Metode Tyreus-Luyben, Steady State

Abstract

A single link flexible joint manipulator robot is one manifestation of the development of modern control technology. One application of a single link flexible joint manipulator robot is a space robot. In carrying out movements, robot manipulators sometimes have problems with flexibility, namely inaccurate positions caused by vibrations. The purpose of this study was to design a PID controller Tyreus-Luyben to overcome the flexibility problem in manipulator robots. The results of the study show that the PID parameter values found using the Tyreus-Luyben method are $K_p = 6.26$, $K_i = 0.3367$, and $K_d = 0.216$. Then the value is applied to the system and gives a good oscillation response at setpoint 180° with a maximum overshoot of 182° , time constant (τ) of 1.86s, time sampling (T_s) at 3.22s, rise time (T_r) for 4.0868s, delay time (T_d) for 1.2893s, and peak time (T_p) when 3.02s.

Keywords: Manipulator Robot, PID Controller, Tyreus-Luyben Method, Steady State

PENDAHULUAN

Di era modern, beberapa pekerjaan manusia sudah semakin tergantikan oleh teknologi kendali otomatis terutama dalam bidang industri. Bukti dari tergantikannya peran manusia oleh teknologi otomatis yaitu banyaknya penelitian selama dua dekade terakhir terhadap robot otomatis berkecepatan tinggi yang membantu industri untuk melakukan aktivitas produksi secara efisien. Salah satu contoh objek penelitian tersebut yaitu robot *single link flexible joint manipulator* (M Abdullahi, Auwalu., dkk. 2014).

Jenis robot ini secara luas diaplikasikan pada *space robot*, *micro-surgery operation*, dan *maintenance plant* nuklir (Mahmood, dkk. 2008). Keuntungan dari robot *single link flexible joint manipulator* adalah mudah dalam

pengoperasiannya karena menggunakan aktuator dengan ukuran yang kecil, konsumsi energi yang rendah, dan konstruksi yang murah. (M Abdullahi, Auwalu., dkk. 2014).

Namun, dalam penggunaannya, robot *single link flexible joint manipulator* masih memiliki permasalahan yaitu fleksibilitas. Fleksibilitas adalah ketidakakuratan posisi akhir yang disebabkan oleh adanya defleksi statis dan vibrasi yang muncul akibat dari efek eksternal pada motor penggerak. Vibrasi merupakan gerakan bolak-balik dalam suatu interval waktu tertentu (Akyuz, Ismail H, dkk. 2012).

Pada penelitian sebelumnya telah didapatkan respon sistem yang baik untuk mengatasi masalah fleksibilitas ini menggunakan kontroler PID dan *State Feedback* pada

rancang *Single Link Flexible Joint Manipulator Robot*. Namun pada penelitian kali ini, nilai dari parameter PID (K_p , K_i , dan K_d) akan ditentukan menggunakan metode Tyreus-Luyben. Tujuan dari penelitian kali ini yaitu untuk mengatasi masalah fleksibilitas dan mendapatkan respon sistem yang lebih baik dengan memberikan kontroler PID Tyreus-Luyben pada sistem robot.

KAJIAN PUSTAKA

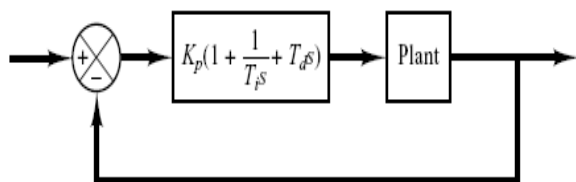
Single Link Flexible Joint Manipulator

Robot *Manipulator* adalah salah satu jenis robot yang paling banyak digunakan pada industri. Dalam industri, robot ini biasa dikenal dengan robot lengan dimana robot ini terdiri dari *link* (rangka) dan *joint* (sendi). Robot *Manipulator* yang meniru karakteristik lengan manusia disebut juga lengan diartikulasikan. Semua sendi yang digunakan robot manipulator adalah *rotary*. Sehingga dapat dikatakan gerakan lengan robot berbeda dari gerakan lengan manusia karena gerakan robot dapat bergerak bebas dibanding lengan manusia (Rafiuddin, Syam. 2015).

PID (*Proportional-Integral-Derivative*)

PID (*Proportional - Integral - Derrivative*) adalah salah satu metode kontrol klasik yang sering digunakan saat ini terutama pada industri karena struktur sederhana dan bekerja stabil (Alfa Syahroni L, Yosin dan M. Syariffudien Zuhrie. 2018).

PID memiliki dinamika kontrol yang optimal dengan *error steady state* sistemnya bernilai nol, respon sistem yang cepat (*Rise time* pendek), tidak ada osilasi dan stabilitas yang lebih tinggi. Perlunya menggunakan komponen gain turunan selain pengontrol PI adalah untuk menghilangkan overshoot dan osilasi yang terjadi dalam respons *output* sistem. Salah satu keuntungan utama dari pengontrol PID adalah dapat digunakan dengan proses urutan yang lebih tinggi termasuk lebih dari penyimpanan energi tunggal (Temel, Sena, dkk. 2013). Berikut merupakan diagram blok sistem kontrol PID.

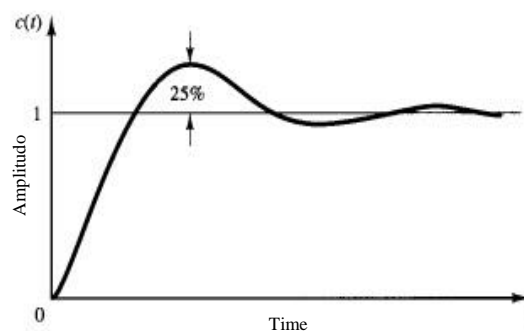


Gambar 1. Diagram Blok Sistem Kontrol PID
(Sumber: Ogata, Katsuhiko. 2010)

Metode Tuning Tyreus Luyben

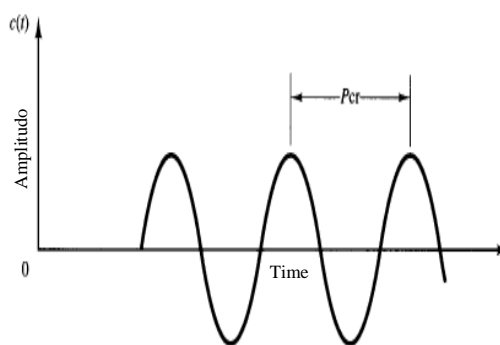
Metode Tyreus-Luyben Merupakan metode tuning PID controller yang digagas Bjorn D. Tyreus · William

L. Luyben pada tahun 1992 yang bertujuan untuk menentukan nilai Kontroler *Proportional* (K_p), Waktu *Integral* (T_i), dan Waktu *Derivative* (T_d) berdasarkan karakteristik respon transien dari sebuah plant (Shahrokhi, Mohammad dan Alireza Z. 2012). Metode ini akan memberikan nilai overshoot sebesar 25% pada step response seperti Gambar 2. Metode ini hampir sama dengan metode tuning yang digagas oleh Ziegler-Nichols namun perbedaannya terletak pada perhitungan dari parameter PID. Metode ini biasanya digunakan untuk mengurangi respon osilasi pada sistem dan memberikan respon gangguan yang lebih baik. (Taan, Ahmad. 2015)



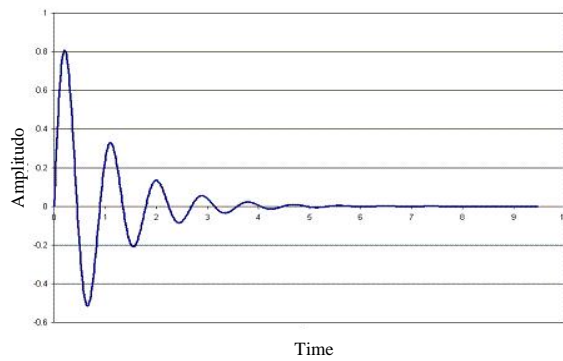
Gambar 2. Grafik Respon Orde Dua Terhadap Masukkan Unit Step
(Sumber: Ogata, Katsuhiko. 2010)

Metode ini dilakukan dengan menggunakan proportional band saja. Nilai K_p dinaikkan dari 0 hingga tercapai nilai K_p yang menghasilkan osilasi yang konsisten. Maksud dari osilasi konsisten bisa dilihat pada Gambar 3. Nilai K_p yang menyebabkan osilasi maksimum ini disebut sebagai critical gain (K_{cr}), sedangkan waktu yang dibutuhkan antar puncak osilasi disebut sebagai periode kritis (P_{cr}).



Gambar 3. Osilasi Konsisten
(Sumber: Ogata, Katsuhiko. 2010)

Jika K_p ini terlalu kecil, sinyal output akan teredam mencapai nilai titik keseimbangan setelah ada gangguan, seperti terlihat pada gambar di bawah ini.

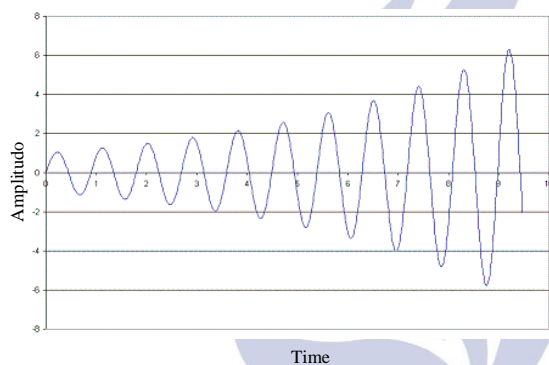


Gambar 4. Sistem Teredam
(Sumber: Ogata, Katsuhiko. 2010)



Gambar 6. Rotary Encoder
(Sumber: Omron)

Sebaliknya, jika K_p terlalu besar, osilasinya akan tidak stabil dan membesar, seperti gambar di bawah ini.



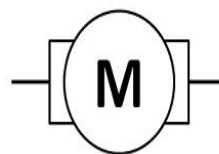
Gambar 5. Sistem Tidak Tereadam
(Sumber: Ogata, Katsuhiko. 2010)

Jika dengan metode ini tidak diperoleh osilasi yang konsisten, maka metode ini tidak dapat dilakukan. Dari metode ini akan diperoleh nilai critical gain K_{cr} dan periode kritis P_{cr} , seperti pada Gambar 3.

Penerapan dari penggunaan rotary encoder sering dijumpai pada robot-robot yang membutuhkan kepresisian tinggi dalam hal posisi seperti robot Mechanum dan robot Omni, selain itu untuk robot berjenis Differential Drive (ex: robot Tank) juga disarankan menggunakan rotary encoder untuk mengatur agar kecepatan putar motor di roda kiri dan kanan bisa sama (Anonymous, 2016).

Motor DC

Motor listrik kadangkala disebut “kuda kerja” nya industri, sebab diperkirakan bahwa motor-motor menggunakan sekitar 70% beban listrik total di industri. Berdasarkan arah arus yang digunakan, motor listrik dibagi menjadi dua jenis yaitu motor arus searah (DC) dan motor arus bolak balik (AC) (Hage, 2008).



(a) Simbol Motor DC (b) Bentuk Motor DC

Gambar 7. Simbol dan Bentuk Motor DC
(Sumber: Kho, Dickson. 2017)

Tabel 1. Penentuan Parameter PID Tyreus-Luyben

Type of Controller	K _p	T _i	T _d
PI	$0.45K_{cr}$	$2.2P_{cr}$	0
PID	$0.313K_{cr}$	$2.2P_{cr}$	$0.16P_{cr}$

(Sumber: Taan, Ahmad. 2015)

Rotary Encoder

Rotary Encoder adalah suatu komponen elektromekanis yang memiliki fungsi untuk memantau posisi angular pada suatu poros yang berputar. Dari perputaran benda tersebut data yang terpantau akan diubah ke dalam bentuk data digital oleh *rotary encoder* berupa lebar pulsa kemudian akan dihubungkan ke kontroler. Berdasarkan data yang di dapat berupa posisi angular (sudut) kemudian dapat diolah oleh kontroler sehingga mendapatkan data berupa kecepatan, arah, dan posisi dari perputaran porosnya. (Anonymous, 2016).

Terdapat dua bagian utama pada sebuah Motor Listrik DC, yaitu stator dan rotor.

1. Stator adalah bagian motor yang tidak berputar, bagian yang statis ini terdiri dari rangka dan kumparan medan.
2. Rotor adalah bagian yang berputar, bagian Rotor ini terdiri dari kumparan jangkar.

Dua bagian utama ini dapat dibagi lagi menjadi beberapa komponen penting yaitu diantaranya adalah *Yoke* (kerangka magnet), *Poles* (kutub motor), *Field winding* (kumparan medan magnet), *Armature Winding*

(kumparan jangkar), *Commutator* (komutator) dan *Brushes* (kuas/sikat arang).

Pada prinsipnya motor listrik DC menggunakan fenomena elektromagnet untuk bergerak, ketika arus listrik diberikan ke kumparan, permukaan kumparan yang bersifat utara akan bergerak menghadap ke magnet yang berkutub selatan dan kumparan yang bersifat selatan akan bergerak menghadap ke utara magnet. Saat ini, karena kutub utara kumparan bertemu dengan kutub selatan magnet ataupun kutub selatan kumparan bertemu dengan kutub utara magnet maka akan terjadi saling tarik menarik yang menyebabkan pergerakan kumparan berhenti (Kho, Dickson. 2017).

Analisis Karakteristik Orde Satu

Dari model matematis sebuah sistem, orde dari suatu sistem dapat dilihat dari besar pangkat variabel s (dalam transformasi Laplace). Suatu sistem dikatakan ber-orde satu jika fungsi alihnya mempunyai variabel s dengan pangkat tertinggi satu. Bentuk fisisnya bisa berupa rangkaian listrik RC, sistem termal, atau sistem lainnya (Ogata, Katsuhiko, 2010). Model sistem orde satu secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (1)$$

Keterangan :

$C(s)$ = Output sistem .

$R(s)$ = Input sistem.

K = Gain Overall.

$\tau s + 1$ = Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai 63,2% (detik) pada orde satu.

Untuk menentukan parameter K (*Gain Overall*) jika sistem linier, maka hubungan Y_{ss} dengan X_{ss} dapat dituliskan sebagai berikut :

$$K = \frac{Y_{ss}}{X_{ss}} \quad (2)$$

Keterangan :

X_{ss} = *Setpoint*.

Y_{ss} = Hasil Respon.

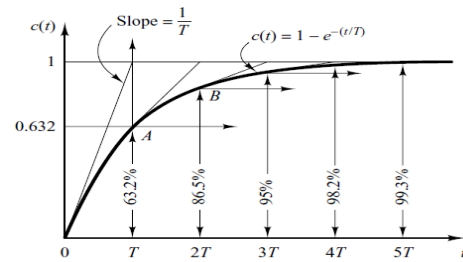
Untuk menentukan konstanta waktu (τ) dapat dihitung melalui respon keluaran sistem ketika mencapai 63,2% dari hasil akhirnya $C(\tau)$ dapat dihitung sebagai berikut :

$$C(\tau) = 0.632 \times Y_{ss} \quad (3)$$

Keterangan :

$C(\tau)$ = Keluaran sistem ketika 63,2% dari hasil akhir.

Bentuk kurva tanggapan eksponensial orde satu ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Kurva Tanggapan Eksponensial Orde 1
(Sumber : Ogata, Katsuhiko, 2010)

Rumus analitik untuk perhitungan parameter respon dari orde satu sebagai berikut :

1. Waktu tunda (t_d)

$$T_d = \tau \ln 2 \quad (4)$$

2. Waktu naik (t_r)

- a. Waktu naik (5% -95%)

$$T_r = \tau \ln 19 \quad (5)$$

- b. Waktu naik (10% -90%)

$$T_r = \tau \ln 9 \quad (6)$$

3. Waktu Tunak (t_s)

- a. Waktu tunak (0.5%)

$$T_s = 5\tau \quad (7)$$

- b. Waktu tunak (2%)

$$T_s = 4\tau \quad (8)$$

- c. Waktu tunak (5%)

$$T_s = 3\tau \quad (9)$$

4. Persentase *Error Steady State* (Ess)

$$Ess = \left| \frac{Y_{ss} - X_{ss}}{X_{ss}} \right| \times 100\% \quad (10)$$

METODE PENELITIAN

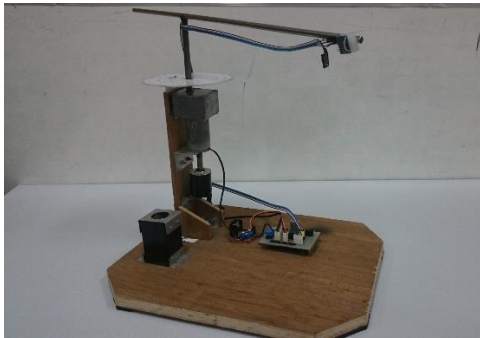
Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif. Yaitu melibatkan perhitungan angka atau kuantifikasi data. Pengumpulan data dilakukan melalui pengukuran dengan menggunakan alat yang objektif dan baku (Kasiram, Moh. 2008).

Rancang bangun *Hardware*

Robot ini nantinya akan menggunakan sebuah besi silinder yang difungsikan sebagai lengan. Penggunaan dari besi silinder tersebut dikarenakan memiliki fleksibilitas yang cukup kecil sehingga vibrasi yang muncul hanya disebabkan oleh motor tidak ditambah dengan vibrasi akibat fleksibilitas bahan lengan yang tinggi. Selain itu, komponen lain yang digunakan adalah driver motor dengan tipe L298N, Arduino UNO, Motor DC 12V, dan Rotary Encoder tipe RS3900.

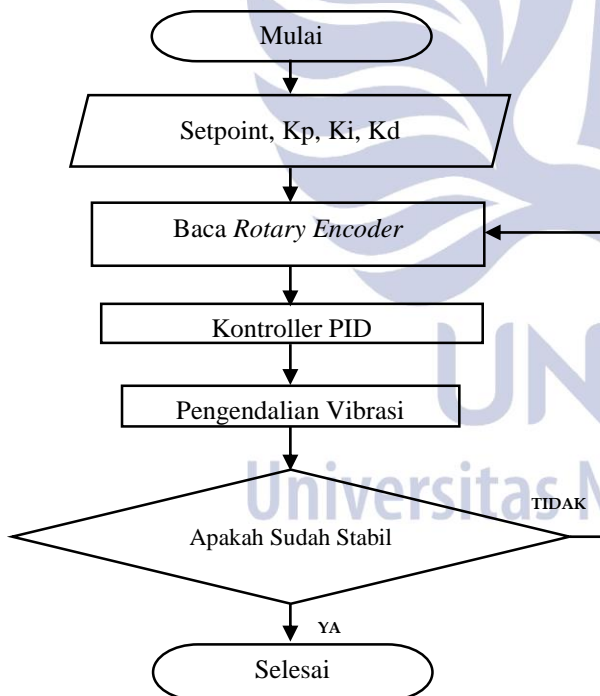
Rancang bangun hardware single link flekxible joint manipulator dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Model Kerangka Robot Single Link Flekxible Joint Manipulator

Rancang Bangun Software

Pada bagian software akan dibuat sebuah program pada *software* Arduino dan kemudian disinkronkan pada mikrokontroler Arduino dan Microsoft Excel untuk menyimpan data secara otomatis. Data yang tersimpan kemudian diolah pada aplikasi Matlab untuk mendapatkan nilai-nilai berdasarkan karakteristik respon. Berikut ini merupakan diagram alir dari rancangan pada penelitian ini.



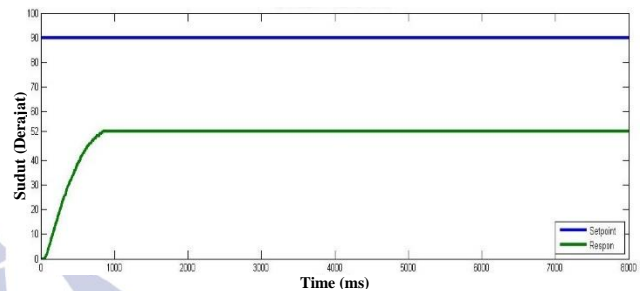
Gambar 10. Diagram Alir Software

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini akan dibahas proses pemodelan dan identifikasi sistem, penentuan parameter PID, dan implementasi PID dan analisis terhadap respon *plant*.

Pemodelan dan Identifikasi Sistem

Model matematis dari *plant* didapatkan dengan memasukkan program tanpa kontroler ke arduino yang telah terhubung dengan *plant*. Berikut ini merupakan gambar dari grafik respon sistem tanpa kontroler dengan *setpoint* 90°.



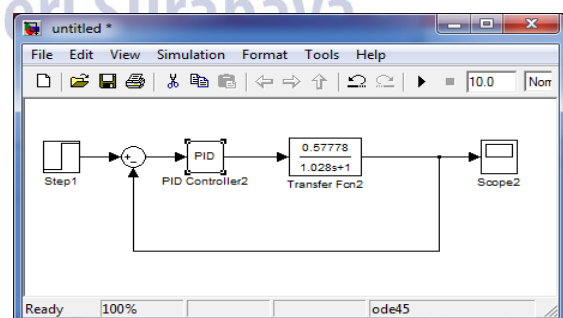
Gambar 11. Grafik Respon Sistem tanpa Kontroler (Loop Terbuka) *Setpoint* 90°

Dapat diketahui dari Gambar 11 bahwa saat sistem tanpa diberikan kontroler dengan *setpoint* 90° menghasilkan respon *steady state* saat sudut 52°. Dengan nilai K berdasarkan Persamaan 2 adalah 0.5778 dan nilai $C(\tau)$ berdasarkan Persamaan 3 adalah 32.864° atau dibulatkan menjadi 33°. Sehingga waktu (τ) saat mencapai $C(\tau)$ berdasarkan data adalah 1.028s. Sehingga berdasarkan Persamaan 1, fungsi alih dari *plant* robot *single link flexible joint manipulator* dapat ditulis sebagai berikut,

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{0.5778}{1.028s + 1}$$

Penentuan Parameter PID

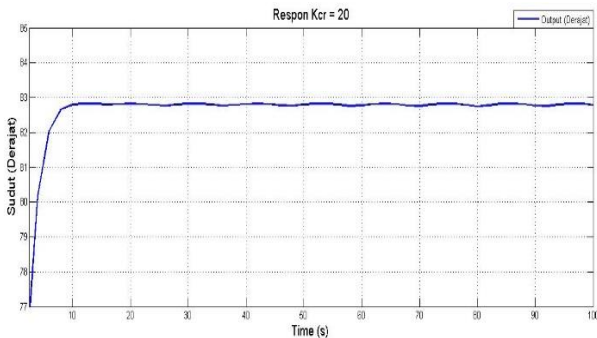
Setelah didapatkan fungsi alih *plant*, selanjutnya adalah menentukan nilai parameter PID yaitu nilai Kp, Ki, dan Kd sebelum diaplikasikan pada *plant*. Penentuan nilai parameter PID dilakukan dengan menggunakan *simulink* pada Matlab dengan membuat blok sistem seperti Gambar 12 berikut ini.



Gambar 12. Blok Sistem dengan PID pada *Simulink* Matlab

Nilai dari parameter PID didapatkan dengan menaikkan nilai Kp hingga menghasilkan respon sistem

yang berkelanjutan. Percobaan untuk mendapatkan hasil respon osilasi berkelanjutan pada $K_p = 20$, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13 berikut ini.



Gambar 13. Respon Simulasi Sistem dengan $K_p = 20$

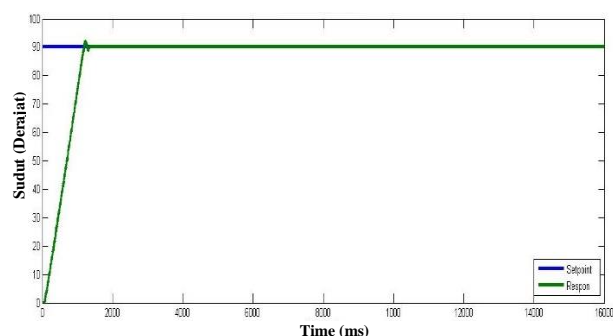
Berdasarkan ketiga hasil respon tersebut dapat kita ketahui bahwa respon mengalami osilasi berkelanjutan pada saat nilai K_p sebesar 20. Sehingga nilai K_{cr} yang digunakan untuk menentukan nilai parameter PID adalah 20. Nilai inilah yang digunakan untuk menentukan nilai dari kontroler proporsional.

Dalam metode ini, selain membutuhkan nilai K_{cr} untuk menentukan nilai kontroler proporsional, nilai dari kontroler integral dan derivative juga diperlukan dengan cara mencari nilai P_{cr} . Nilai P_{cr} merupakan waktu antar puncak osilasi. Puncak osilasi dari respon ini adalah 82,82. Maka nilai P_{cr} pada saat mencapai puncak osilasi adalah 1.35s. Sehingga nilai dari K_p , K_i , dan K_d berdasarkan Tabel 1 adalah $K_p = 6.26$, $K_i = 0.3367$, dan $K_d = 0.216$.

Implementasi PID dan Analisis Respon Plant

Setelah mendapatkan nilai parameter PID, nilai tersebut kemudian dimasukkan ke dalam program arduino untuk diimplementasikan pada *plant system* dengan 3 *setpoint* yang berbeda yaitu 90 derajat, 180 derajat, dan 270 derajat. Implementasi kendali PID pada plant menghasilkan respon sebagai berikut.

1. Implementasi PID Setpoint 90°



Gambar 14. Grafik Respon *Plant* Menggunakan Kontroler PID Tyreus Luyben dengan Setpoint 90°

Gambar 14 diatas menampilkan grafik respon sistem menggunakan kontroler PID Tyreus-Luyben dengan Setpoint 90° selama ± 18 detik. Berikut merupakan karakteristik responnya.

a. Time Constant (τ)

Nilai $C(\tau)$ dari kedua respon ini adalah sama yaitu 56.88° atau dibulatkan menjadi 57°. Nilai tersebut merupakan 0.632 dari 90°. Waktu (τ) yang dibutuhkan untuk respon mencapai sudut 57° adalah 1.007s.

b. Settling Time

Settling Time merupakan waktu saat respon mengalami *steady state*. Dengan demikian *Settling Time* untuk metode Tyreus-Luyben adalah 1.748s.

c. Rise Time

Rise Time (10%-90%) berdasarkan Persamaan 6 adalah $\tau \times \ln 9$. Dengan demikian *Rise Time* (10%-90%) untuk metode Tyreus-Luyben adalah 2.212s.

d. Delay Time

Delay Time berdasarkan Persamaan 4 adalah $\tau \times \ln 2$. Dengan demikian *Delay Time* untuk metode Tyreus-Luyben adalah 0.697s.

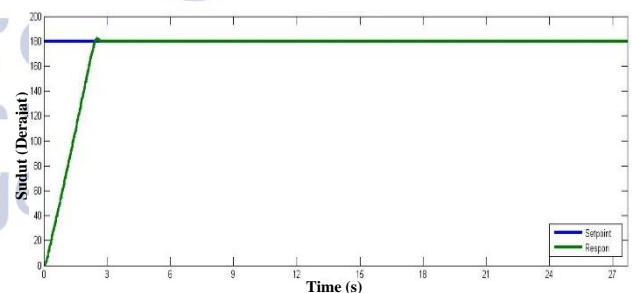
e. Maximum Overshoot

Untuk respon dengan setpoint 90° menggunakan metode Tyreus-Luyben memiliki *Maximum Overshoot* sebesar 92°.

f. Peak Time

Peak Time untuk respon dengan setpoint 90° menggunakan metode Tyreus-Luyben adalah 1.59s.

2. Implementasi PID Setpoint 180°



Gambar 15. Grafik Respon Sistem Menggunakan Kontroler PID Tyreus Luyben dengan Setpoint 180°

Gambar 15 diatas menampilkan grafik respon sistem menggunakan kontroler PID Tyreus-Luyben dengan Setpoint 180° selama ± 27 detik. Berikut merupakan karakteristik responnya.

a. Time Constant (τ)

Nilai $C(\tau)$ dari kedua respon ini adalah sama yaitu 113.76° atau dibulatkan menjadi 114°. nilai tersebut merupakan 0.632 dari 180°. Dengan

demikian, waktu yang dibutuhkan untuk respon mencapai sudut 114° adalah 1.86s.

b. *Settling Time* ($\pm 0.5\%$)

Settling Time merupakan waktu saat respon mengalami *steady state*. Dengan demikian, *Settling Time* untuk metode Tyreus-Luyben adalah 3.22s.

c. *Rise Time*

Rise Time (10%-90%) berdasarkan Persamaan 6 adalah $\tau \times \ln 9$. Dengan demikian, *Rise Time* (10%-90%) untuk metode Tyreus-Luyben adalah 4.087s.

d. *Delay Time*

Delay Time berdasarkan Persamaan 4 adalah $\tau \times \ln 2$. Dengan demikian, *Delay Time* untuk metode Tyreus-Luyben adalah 1.29s.

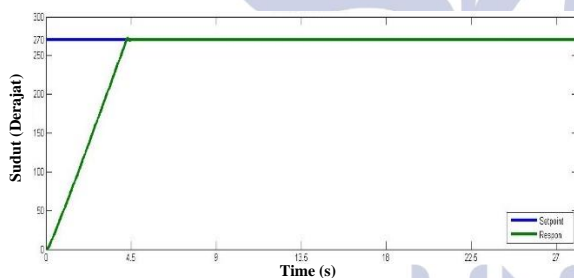
e. *Maximum Overshoot*

Untuk respon dengan *setpoint* 180° menggunakan metode Tyreus-Luyben memiliki *Maximum Overshoot* sebesar 182° .

f. *Peak Time*

Peak Time untuk respon dengan *setpoint* 180° menggunakan metode Tyreus-Luyben adalah 3.02s.

3. Implementasi PID *Setpoint* 270°



Gambar 16. Grafik Respon Sistem Menggunakan Kontroler PID Tyreus Luyben dengan *Setpoint* 270°

Gambar 16 diatas menampilkan grafik respon sistem menggunakan kontroler PID Tyreus-Luyben dengan *Setpoint* 270° selama ± 27 detik. Berikut merupakan karakteristik responnya.

a. *Time Constant* (τ)

Nilai $C(\tau)$ dari kedua respon ini adalah sama yaitu 170.64° atau dibulatkan menjadi 171° . nilai tersebut merupakan 0.632 dari 270° . Dengan demikian, waktu yang dibutuhkan untuk respon mencapai sudut 171° adalah 2.7425s.

b. *Settling Time*

Settling Time merupakan waktu saat respon mengalami *steady state*. Dengan demikian, *Settling Time* untuk metode Tyreus-Luyben adalah 4.5s.

c. *Rise Time*

Nilai *Rise Time* (10%-90%) berdasarkan Persamaan 6 adalah $\tau \times \ln 9$. Dengan demikian, nilai dari *Rise Time* (10%-90%) untuk metode Tyreus-Luyben adalah 6.025s.

d. *Delay Time*

Nilai *Delay Time* berdasarkan Persamaan 4 adalah $\tau \times \ln 2$. Dengan demikian, nilai dari *Delay Time* untuk metode Tyreus-Luyben adalah 1.9s.

e. *Maximum Overshoot*

Untuk respon dengan *setpoint* 270° menggunakan metode Tyreus-Luyben memiliki *Maximum Overshoot* sebesar 272° .

f. *Peak Time*

Nilai *Peak Time* untuk respon dengan *setpoint* 270° menggunakan metode Tyreus-Luyben adalah 4.33s.

Berdasarkan analisis terhadap hasil respon saat diberikan ketiga *setpoint* tersebut, Nilai-nilai variabel dari karakteristik respon transien dan *steady state* dapat dirangkum pada Tabel 2 berikut ini.

Tabel 2. Nilai Variabel terhadap Hasil Respon *Plant*

Variabel	<i>Setpoint</i> ($^\circ$)		
	90	180	270
τ (s)	1,007	1,86	2,7425
T_s (s)	1,748	3,22	4,5
T_r (s)	2,212	4,0868	6,0259
T_d (s)	0,697	1,2893	1,9010
Max.Overshoot ($^\circ$)	92	182	272
T_p (s)	1,59	3,02	4.33

PENUTUP

Simpulan

Berdasarkan data hasil respon yang telah diperoleh dan setelah dilakukan analisis, maka didapatkan fungsi alih dari *plant* robot *Single Link Flexible Joint Manipulator* pada penelitian ini adalah

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{0,5778}{1,028s + 1}$$

Dengan nilai parameter PID yang didapatkan melalui metode Tyreus-Luyben adalah $K_p = 6.26$, $K_i = 0.3367$, dan $K_d = 0.216$. Kemudian nilai tersebut diterapkan pada *Plant* dan memberikan respon osilasi yang baik pada *setpoint* 180° dengan maksimum overshoot sebesar 182° seperti yang ditunjukkan pada Gambar 15. Dengan nilai-nilai karakteristik respon lainnya yang terdapat pada Tabel 2 yaitu *time constant* (τ) sebesar 1.86s, *time*

sampling (T_s) pada 3.22s, *rise time* (T_p) selama 4.0868s, *delay time* (T_d) selama 1.2893s, dan *peak time* (T_p) saat 3.02s.

Saran

Fungsi alih *plant* ini hanya dapat digunakan pada *plant* pada penelitian ini dikarenakan perbedaan nilai pada beberapa parameter namun peneliti menyarankan untuk menggunakan metode lain dalam penentuan parameter PID untuk mendapatkan respon yang lebih baik lagi dengan menjadikan nilai parameter PID pada penelitian ini sebagai acuan.

DAFTAR PUSTAKA

- Akyuz, Ismail H. dkk. 2012. *Cascade fuzzy logic control of a single link flexible joint manipulator*. Department of Mechatronics Engineering Kocaeli University, Kocaeli, TURKEY. Vol 20:5.
- Alfa Syahroni L, Yosin dan M. Syariffudien Zuhrie. 2018. Rancang Bangun Pengendalian Vibrasi Pada *Single Link Flexible Joint Manipulator Robot* Berbasis *PID Controller*. Jurnal Teknik Elektro. Vol 7:3, 183-190.
- Anonymous. 2016. Pengertian Rotary Encoder. (<https://karyainovasiku.blogspot.com/2016/02/pengertian-rotary-encoder.html>) diakses pada 22 Desember 2018.
- Hage. 2008. Motor Listrik. (www.dunia-listrik.blogspot.com/2008/12/motor-listrik.html) diakses pada 05 Januari 2019.
- Kasiram, Moh. 2008. "Metodologi Penelitian". Malang: UIN Malang.
- Kho, Dickson. 2017. Pengertian Motor DC Dan Prinsip Kerjanya. (www.teknikelektronika.com/pengertian-motor-dc-prinsip-kerja-dc-motor/) diakses pada 25 Januari 2019
- M Abdullahi, Auwalu., dkk. 2014. Resonant Control of a Single-Link Flexible Manipulator. Jurnal Teknologi (Science & Engineering). Vol 67:5, 35-39.
- Mahmood, dkk. 2008. Precise Tip Positioning of a Flexible Manipulator Using Resonant Control. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. Vol 13:2, 180-186.
- Ogata, Katsuhiko. 2010. Modern Control Engineering Fifth Edition. Pearson Education, Inc. USA.
- Omron. *Technical Explanation for Rotary Encoders*. Omron Industrial Automation. New Zealand.
- Rafiuddin, Syam. 2015. *Seri Buku Ajar Robotika: Kinematika dan Dinamika Robot Lengan*. Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
- Shahrokhi, Mohammad dan Alireza Z. 2012. Comparison of PID Controller Tuning Methods. Department of Chemical & Petroleum Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.
- Siswoyo, Bambang. 2012. Motor DC Model State Space. (<http://bsiswoyo.lecture.ub.ac.id/201/01/motor-dc-model-state-space/>) diakses pada tanggal 11 Januari 2019.
- Taan, Ahmad. 2015. PID Controller Tuning. (<https://www.slideshare.net/AhmadTaan/pid-controller-tuning-49463158>) diakses pada tanggal 11 Januari 2019.
- Temel, Sena, dkk. 2013. *P, PD, PI, PID CONTROLLERS*. Electrical And Electronics Engineering Department, Middle East Technical University.